



## Technique d'analyse globale pour antennes réseaux réflecteurs reconfigurables

Clement Yann, Renaud Loison, Raphaël Gillard, Michèle Labeyrie, Jean-Paul  
Martinaud

### ► To cite this version:

Clement Yann, Renaud Loison, Raphaël Gillard, Michèle Labeyrie, Jean-Paul Martinaud. Technique d'analyse globale pour antennes réseaux réflecteurs reconfigurables. 17ème Journées Nationales Micro-ondes, May 2011, Brest, France. pp. hal-00657317

**HAL Id: hal-00657317**

**<https://hal.science/hal-00657317>**

Submitted on 6 Jan 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Technique d'analyse globale pour antennes réseaux réflecteurs reconfigurables

Clément Yann<sup>1</sup>, Renaud Loison<sup>1</sup>, Raphaël Gillard<sup>1</sup>, Michèle Labeyrie<sup>2</sup>, Jean-Paul Martinaud<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Européenne de Bretagne, France, INSA, IETR, UMR 6164, F-35708 Rennes,

<sup>2</sup>Thales Systèmes Aéroportés, Elancourt, France  
Clement.Yann@insa-rennes.fr

### Résumé

Cet article se focalise sur la simulation de reflectarrays reconfigurables. Une nouvelle technique d'analyse combinant l'approche de la cellule environnée et la méthode de compression est présentée. Elle considère l'environnement réel des éléments rayonnants et ne nécessite qu'une seule simulation électromagnétique suivie de simulations circuits pour l'ensemble du reflectarray.

### 1. Introduction

Les antennes à réseau réflecteur ou reflectarrays [1] constituent une solution attractive pour de nombreuses applications dans le domaine des télécommunications. Comme détaillé sur la Figure 1, un reflectarray est composé d'une source primaire qui illumine un réseau de cellules déphaseuses.

Pour les reflectarrays reconfigurables, la phase de l'onde rayonnée est ajustable par l'introduction d'éléments actifs type diodes ou MEMS [2]. Les cellules sont géométriquement identiques mais diffèrent uniquement par l'état des éléments actifs qu'elles intègrent. Elles ont la capacité de modifier la phase de l'onde rayonnée en manipulant électroniquement l'état des éléments actifs. Quand les états de tous les éléments actifs sont spécifiés, une configuration de reflectarray est définie. Le diagramme de rayonnement peut ainsi être contrôlé en modifiant de manière dynamique la configuration.

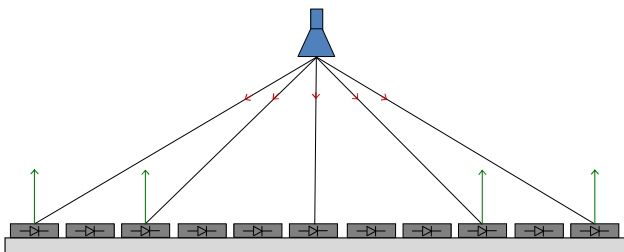


Figure 1. Antenne reflectarray reconfigurable

L'analyse d'un reflectarray constitue la problématique principale de ce type d'antenne. Étant donné la taille conséquente du réseau réflecteur par rapport à la longueur d'onde, différentes approches segmentaires ont été élaborées.

Dans le cas des reflectarrays passifs, deux méthodes sont généralement employées : l'approche de Floquet [3] et la méthode de la cellule environnée [4]. Dans les deux cas, le rayonnement du reflectarray complet est obtenu en combinant

les rayonnements des cellules élémentaires. L'approche de Floquet considère que chaque cellule est extraite d'un réseau infini périodique de cellules toutes identiques. Cette méthode approxime les couplages puisque, en pratique, chaque cellule du réseau est différente. La méthode de la cellule environnée consiste à étudier chaque cellule environnée de ses cellules adjacentes. Ainsi, l'étude d'un reflectarray de N cellules nécessite l'analyse de N sous-réseaux.

Pour les reflectarrays reconfigurables, l'approche de Floquet peut être combinée à la méthode de compression [5], [6] pour simuler chaque cellule chargée par des éléments actifs. La simulation électromagnétique de la cellule étudiée est réalisée puis une simulation circuit est effectuée pour déterminer la réponse de la cellule à n'importe quelle configuration des éléments actifs [7].

Dans ce papier, nous proposons une méthode combinant l'approche de la cellule environnée et la méthode de compression pour analyser un reflectarray reconfigurable.

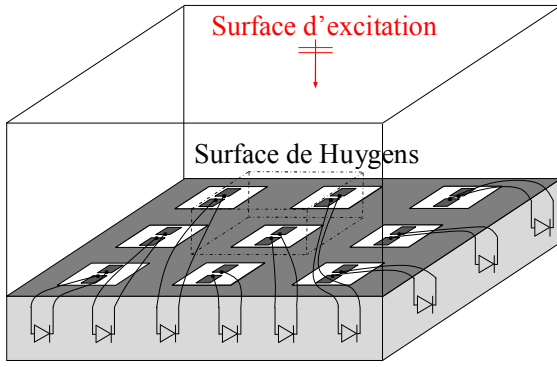
### 2. Principe

Afin de déterminer le diagramme de rayonnement du reflectarray, la méthode proposée ici consiste à déterminer le champ rayonné par chaque cellule en prenant en compte son environnement réel. Le diagramme de rayonnement de chaque cellule environnée s'obtient à partir de la simulation de sous-réseaux composés de la cellule étudiée et de ses voisines.

Pour obtenir le rayonnement de la cellule étudiée, l'ensemble du sous-réseau est éclairé et le champ rayonné par la seule cellule considérée est calculé. Étant donné que les cellules ne diffèrent que par l'état des éléments actifs, l'ensemble des diagrammes de rayonnement environnés se déduit à partir d'une unique simulation électromagnétique et d'un rapide post-traitement.

Chaque cellule de la surface réflectrice est étudiée l'une après l'autre avec ses cellules adjacentes (Figure 2). Dans cet exemple, neuf cellules sont considérées mais la méthode peut s'étendre à un sous-réseau plus grand. Dans un souci de simplification, la cellule unitaire est un dipôle et un seul élément actif, qui est une diode, par cellule est considéré.

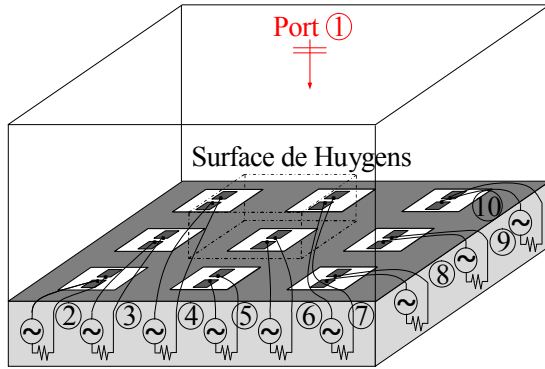
Le sous-réseau est entièrement excité par une onde plane et seul le rayonnement de la cellule étudiée est déterminé à partir de la surface de Huygens. Cette surface permet de déterminer le champ rayonné de la cellule étudiée lorsque toutes les cellules du sous-réseau sont excitées.



**Figure 2. Sous-réseau de 9 cellules**

Les éléments actifs considérés ont des dimensions négligeables par rapport à la longueur d'onde et peuvent ainsi être considérés comme des éléments localisés. Le sous-réseau est décomposé en deux parties. La première partie est constituée des éléments actifs et la deuxième, la partie passive distribuée, est constituée du sous-réseau, les éléments actifs étant remplacés par des ports.

Tout d'abord, la simulation électromagnétique de la partie passive distribuée, représentée sur la Figure 3, est effectuée.



**Figure 3. Simulation électromagnétique du sous-réseau 3x3**

Ensuite, chacun des neuf ports plus le port d'excitation est excité indépendamment. Quand un port est excité, les autres sont terminés sur 50 Ohms. Quand le port  $k$  est excité, une onde incidente  $a_k$  est envoyée et le champ rayonné normalisé  $\vec{\mathcal{E}}_k^r = \frac{\vec{E}_k^r}{a_k}$  par la cellule centrale est enregistré. Les coefficients de réflexion et de transmission entre les ports sont assemblés dans une matrice de répartition généralisée  $[S]$ .

Puis, la méthode de compression est appliquée pour prendre en compte les impédances équivalentes des diodes à l'état passant ou bloqué. Une simulation circuit est réalisée (Figure 4), c'est-à-dire qu'une onde  $a_1$  est envoyée sur le port 1 et le simulateur calcule les autres coefficients  $a_k$  et  $b_k$ . Le coefficient  $a_1$  associé au port 1 dépend de l'amplitude désirée

et il est égal à  $a_1 = \sqrt{\frac{\|\vec{E}_1^{\text{inc}}\|^2}{\eta_0}} S$  avec  $S$  la surface d'excitation,  $\vec{E}_1^{\text{inc}}$

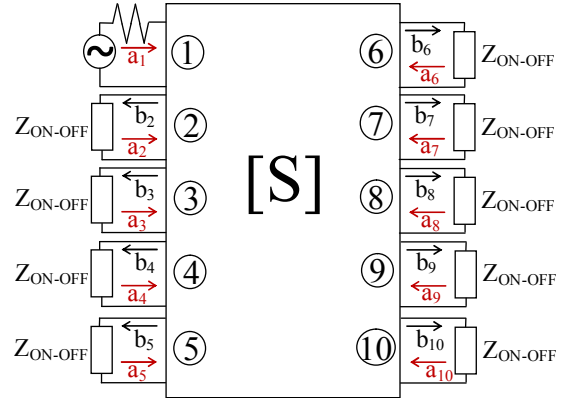
le champ incident sur le port 1 et  $\eta_0$  l'impédance du vide. Les coefficients calculés  $a_i$   $2 \leq i \leq 10$  correspondent aux pondérations

entre les diagrammes de rayonnement précédemment enregistrés de la structure chargée.

Pour finir, la réponse de la cellule est obtenue en ajoutant les contributions de chaque port. Le champ électrique rayonné par la cellule est :

$$\vec{E}_{\text{cellule}}^r = \sum_{k=1}^{10} a_k \vec{\mathcal{E}}_k^r$$

La méthode est décrite pour une polarisation et un angle d'incidence. La généralisation est obtenue simplement en ajoutant un port d'excitation pour chaque polarisation et incidence.



**Figure 4. Matrice S généralisée**

Cette procédure est répétée pour toutes les cellules en utilisant la même simulation électromagnétique et les réponses individuelles sont déterminées. D'après le principe de superposition, le diagramme de rayonnement de l'antenne globale est la somme des contributions de chaque cellule.

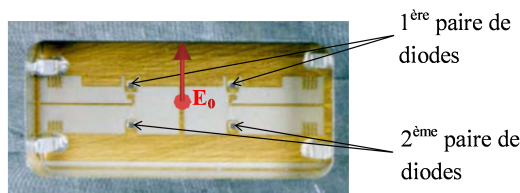
### 3. Avantages de la méthode

L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle permet de prendre en compte les couplages mutuels. Contrairement à la méthode de Floquet, elle considère l'environnement réel des éléments rayonnants. De plus, elle ne nécessite qu'une seule simulation électromagnétique pour l'ensemble du reflectarray. Ensuite, le diagramme de rayonnement de n'importe quelle configuration du reflectarray est obtenu rapidement par simulations circuits. Pour finir, l'approche est applicable quelle que soit la méthode numérique de simulation employée (MoM, FEM, FDTD).

### 4. Résultats

Un reflectarray reconfigurable composé de 64 cellules est simulé avec le logiciel commercial HFSS® et avec différentes approches à la fréquence de 8,7GHz.

La cellule unitaire est un circuit imprimé avec 4 diodes à l'intérieur d'un guide rectangulaire [8] comme représenté sur la Figure 5. Les deux paires de diodes, situées sur le circuit imprimé, permettent d'obtenir 4 états de phase. La diode, à l'état passant « On », est équivalente à une résistance de quelques Ohms ( $Z_{\text{On}}$ ) alors que la diode bloquée « Off » se comporte comme une capacité de l'ordre du femtofarad ( $Z_{\text{Off}}$ ).



**Figure 5. Cellule déphaseuse du reflectarray**

Les déphasages obtenus avec les différents états de diode couvrent  $360^\circ$  avec environ  $90^\circ$  entre chaque état de phase (Tableau 1)

Etat	Phase
On-On	$0^\circ$
Off-Off	$-93.1^\circ$
On-Off	$-176.5^\circ$
Off-On	$-224.6^\circ$

**Tableau 1. Etats de phase de la cellule avec l'approche de Floquet en incidence normale à 8,7GHz**

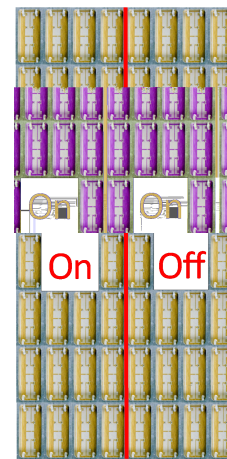
Les cellules sont géométriquement identiques mais les diodes sont commutées dans différents états pour contrôler les caractéristiques du champ rayonné.

Dans cet exemple, un réseau de petites dimensions composé de 64 cellules (Figure 6) est étudié afin de pouvoir le simuler en une seule fois avec HFSS®, les diodes étant remplacées par leur impédance équivalente,  $Z_{On}$  ou  $Z_{Off}$ . Cette simulation de référence permet de comparer les résultats à partir de différentes approches et de valider la méthode proposée. Le réseau est éclairé par une onde plane en incidence normale et le champ électrique est orthogonal à la fente.

Dans cet exemple, le diagramme de rayonnement désiré est un réseau différence avec un nul de rayonnement dans l'axe. Pour obtenir ce type de rayonnement, l'état de toutes les diodes doit être défini. Le réseau est décomposé en deux parties égales et les diodes sont commutées de telle manière qu'un déphasage de  $180^\circ$  est obtenu entre les deux parties. Cette différence de phase est présente entre les états « On-On » et « On-Off » (Tableau 1). Par conséquent, les diodes sont passantes dans la moitié du reflectarray et dans la position « On-Off » dans la deuxième moitié (Figure 6).

Le reflectarray reconfigurable est simulé avec différentes approches :

- Simulation globale du reflectarray en remplaçant les diodes par leur impédance équivalente,
- Approche de Floquet suivi de la méthode de compression,
- Méthode proposée : méthode de la cellule environnée combinée à la méthode de compression avec des sous-réseaux 3x3 et 5x5.



**Figure 6. Reflectarray 8x8**

Les diagrammes de rayonnement obtenus avec les différentes approches sont superposés sur la Figure 7. La référence, représentée en vert, correspond à la simulation de l'antenne globale. La méthode proposée avec des sous-réseaux 5x5 est représentée en rouge et le diagramme en bleu est obtenu à partir de la même approche mais avec des sous-réseaux 3x3.

Premièrement, la méthode proposée donne de meilleurs résultats que l'approche de Floquet, en cyan sur la Figure 7. Deuxièmement, la reconstruction à partir de sous-réseaux de 5x5 cellules est plus précise que la méthode avec des sous-réseaux 3x3. Par conséquent, plus le nombre de cellules environnantes incluses dans la simulation est grand plus la précision est accrue.

Les résultats statistiques synthétisés dans le Tableau 2 comparent les différentes approches par rapport à la simulation de référence. Le paramètre  $\epsilon_{centrale}$  estime la différence d'amplitude entre l'approche considérée et la référence pour  $\theta = 0^\circ$ . L'erreur centrale est de 6,5dB pour Floquet et inférieure à 1dB pour la méthode proposée. Le paramètre  $\sigma$  est l'écart type de la différence d'amplitude entre la méthode étudiée et la référence pour  $\theta \in [-90; 90^\circ]$ . Avec la méthode proposée et avec des sous-réseaux 5x5,  $\sigma$  est égal à 0,31dB ce qui est très faible en comparaison aux 10dB atteints avec la méthode de Floquet. Le paramètre MAE, pour « Mean Absolute Error », est la moyenne de l'écart absolu entre la méthode et la référence pour  $\theta \in [-90; 90^\circ]$ . La même tendance est observée que précédemment avec un MAE de 5,8dB avec Floquet et 0,21dB avec la méthode proposée. De plus, pour chaque paramètre, la méthode proposée avec des sous-réseaux 5x5 est plus précise qu'avec des sous-réseaux 3x3.

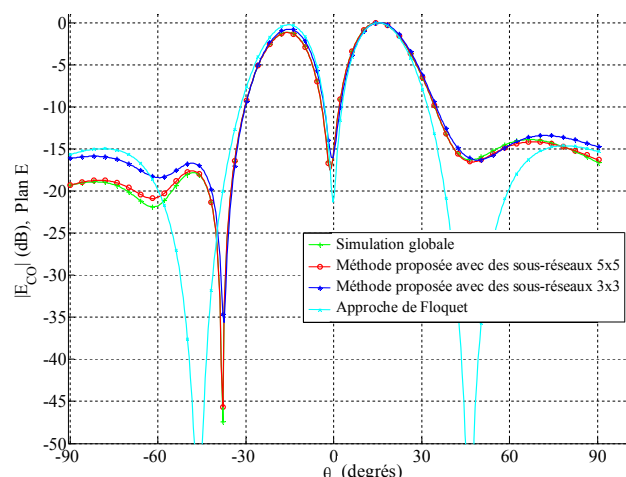


Figure 5. Comparaison de la méthode proposée et de la méthode de Floquet pour un reflectarray 8x8

	Floquet	Méthode proposée avec des sous-réseaux 3x3	Méthode proposée avec des sous-réseaux 5x5
$\epsilon_{centrale}$ (dB)	6,5	2,73	0,08
$\sigma$ (dB)	10	1,5	0,31
MAE(dB)	5,8	1,2	0,21

Tableau 2. Résultats statistiques

De plus, avec 49 Go de RAM et un processeur Intel® Xeon® E5506 2,13GHz Quad Core, la simulation de l'antenne globale nécessite 407 minutes pour chaque configuration du reflectarray reconfigurable. En comparaison, la nouvelle technique d'analyse nécessite 72 minutes pour la première configuration et seulement 38 secondes pour n'importe quelle autre configuration. Dans l'exemple présenté, une seule configuration particulière est étudiée mais la méthode peut facilement analyser toute configuration.

## 5. Conclusion

Une méthode rapide et précise pour l'analyse de reflectarrays reconfigurables est décrite puis validée. Cette nouvelle méthode combine la méthode de la cellule environnée et la technique de compression et prend en compte les couplages mutuels réels entre cellules adjacentes. Les résultats montrent clairement que la méthode proposée est plus précise que l'approche de Floquet. Par ailleurs, la méthode ne requiert qu'une seule simulation électromagnétique et un rapide post-traitement. De plus, cette méthode s'adapte à tout type de reflectarray reconfigurable, indépendamment de la configuration et des dimensions de l'antenne.

## 6. Remerciements

Les auteurs remercient Thales Systèmes Aéroportés, Elancourt, France et l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) pour le financement de l'étude.

## 7. Bibliographie

- [1] D. Berry, R. Malech et W. Kennedy, « *The reflectarray antenna* », IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 11, n°6, Novembre 1963, pp. 645–651.
- [2] H. Legay, B. Pinte, M. Charrier, A. Ziaei, E. Girard et R. Gillard, « *A steerable reflectarray antenna with MEMS controls* », IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Octobre 2003, pp. 494-499.
- [3] J. Montgomery, « *Scattering by an infinite periodic array of microstrip elements* », IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 26, n° 6, Novembre 1978, pp. 850-854.
- [4] M-A. Milon, D. Cadoret, R. Gillard et H. Legay, « *Surrounded-element approach for the simulation of reflectarray radiating cells* », IET Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 1, n° 2, Avril 2007, pp. 289-293.
- [5] J. Kunisch, M. Rittweger, S. Heinen et I. Wolff, « *The compression approach: a new technique for the analysis of distributed circuits containing nonlinear elements* », 21st EuMC Proceedings, Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation, Septembre 1991.
- [6] S. Dauguet, R. Gillard, J. Citerne et G. Piton, « *Extension of the compression approach to include the treatment of radiation pattern in the electromagnetic analysis of active planar antennas* », Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1, Juillet 1997, pp. 22–25.
- [7] R. Pereira, R. Gillard, R. Sauleau, P. Potier, T. Dousset et X. Delestre, « *Four-state dual polarisation unit-cells for reflectarray applications* », Electronics letters, Vol. 46, n°11, Mai 2010.
- [8] X. Delestre, T. Dousset, M. Labeyrie et C. Renard, « *New Challenges for Active ReflectArrays* », International Radar Conference, Bordeaux, France, 13 Octobre 2009.